

# Analyse von Wasserstoffspeichern mit Rückverstromung

## Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Science (B.Sc.)“ im Studiengang  
Wirtschaftsingenieur  
der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für Maschinenbau und der  
Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

Vorgelegt von

Name: Richter

■■■■■■ ■■■■■■

Vorname: Sabrina

■ ■■■■■■

Prüfer: Prof. Dr. Michael H. Breitner

Ort, den\*: Hannover, den 28.10.2014

\*(Datum der Beendigung der Arbeit)

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	III
Tabellenverzeichnis .....	IV
Abkürzungsverzeichnis .....	V
Variablenverzeichnis .....	VI
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit .....	2
1.3 Aufbau der Arbeit .....	2
2 Grundlagen.....	4
2.1 Aktueller Stand der Stromerzeugung in Deutschland .....	4
2.2 Regelenergie.....	6
2.3 Abgrenzung der Speichermöglichkeiten .....	7
2.4 Verwendung von Wasserstoffspeichern .....	8
2.5 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	9
3 Analyse .....	11
3.1 Wertschöpfungskette Wasserstoffspeicherung mit Rückverstromung .....	12
3.1.1 Netzanbindung .....	12
3.1.2 Elektrolyse.....	13
3.1.2.1 Alkalische Elektrolyse .....	14
3.1.2.2 PEM – Elektrolyse.....	15
3.1.2.3 Sauerstoff als Endprodukt .....	16
3.1.2.4 Potenzialvergleich .....	16
3.1.3 Pufferspeicher .....	18
3.1.4 Gemeinkosten .....	19
3.1.5 Speicherung und Entnahme von Wasserstoff .....	20
3.1.5.1 Oberirdische Komponenten.....	21

3.1.5.2 Unterirdische Komponenten .....	22
3.1.5.3 Gesamtbetrachtung.....	24
3.1.6 Rückverstromung .....	24
3.1.4.1 Gasturbine .....	25
3.1.4.2 Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk.....	25
3.1.6.3 Brennstoffzelle .....	27
3.1.6.2 Vergleich der Rückverstromungsanlagen.....	29
3.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	32
3.2.1 Kosten .....	32
3.2.1.1 Fixkosten .....	32
3.2.1.2 Variable Kosten.....	36
3.2.1.3 Kostenfunktion .....	37
3.2.2 Erlöse .....	38
3.2.2.1 Elektrische Energie .....	38
3.2.2.2 Wärmeenergie .....	40
3.2.2.3 Erlösfunktion .....	40
3.2.3 Gewinn .....	41
3.2.4 Break-Even-Analyse .....	44
3.2.5 Handlungsempfehlung.....	46
4 Fazit und Ausblick .....	46
4.1 Zusammenfassung.....	46
4.2 Ausblick .....	49
Literaturverzeichnis .....	50
Ehrenwörtliche Erklärung.....	53

# 1 Einleitung

„Like oil tankers, energy systems have large turning circles.“<sup>1</sup>

Dieser Vergleich soll verdeutlichen, dass die Energiewende weder kurzfristig noch ohne weiteres vollzogen werden kann. Mit dem Zubau regenerativer Energien ist das Ziel einer grünen Stromversorgung noch lange nicht erreicht. Hinter der Veränderung im Energiesystem steckt noch viel mehr als es zunächst den Anschein hat.

## 1.1 Motivation

Im Zuge der Energiewende unterliegt das Energiesystem einer aufwendigen Neugestaltung. Es wird sich als Ziel gesetzt, die Energieerzeugung fossiler Energieträger zu reduzieren. Grund dafür ist zum einen ihre Endlichkeit und zum anderen ihr hoher Ausstoß von Kohlenstoffdioxid während der Stromerzeugung. Besonders Kohlekraftwerke, die mit Braun- oder Steinkohle betrieben werden, haben im Vergleich zu anderen Kraftwerken den höchsten Kohlenstoffdioxidausstoß.<sup>2</sup> Zudem existiert in Deutschland eine hohe Importabhängigkeit von Steinkohle, Erdgas und Erdöl, die laut Prognosen in den nächsten Jahren weiter steigen wird.<sup>3</sup> Aufgrund dieser Aspekte wird die deutsche Bevölkerung in Zukunft mit den Folgen konfrontiert werden, die negative Auswirkungen sowohl auf die Umwelt als auch auf die finanzielle Situation beinhalten. Durch die radioaktive Strahlung während der Stromerzeugung und den dadurch entstehenden atomaren Müll werden zusätzliche Risiken aufgenommen, die ein großes Gefahrenpotenzial darstellen. Besonders nach dem Reaktorunfall in Fukushima 2011 ist dieses Risiko in das Bewusstsein der Menschen eingetreten. Infolgedessen reagierte die deutsche Energiepolitik mit dem Beschluss des Atomausstiegs, der bis zum Jahr 2022 vollzogen werden soll. Um den Ausfall des Energieerhalts durch Kernenergie auszugleichen, soll der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung wachsen. Im Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) wurde dazu das Ziel festgelegt, bis zum Jahr 2050 einen Anteil von 80% zu erreichen. Je höher der Anteil an erneuerbarer Energien an der Stromversorgung ist, desto mehr hängt die Stromerzeugung von den Witterungsbedingungen, wie beispielsweise Windstärke, ab. Demzufolge ist die Energiemenge, die durch regenerative Energien in das Netz eingespeist wird, nicht konstant

---

<sup>1</sup> Watkin, K. (2007), S.54, deutsch: Energiesysteme sind wie Öltanker – sie lassen sich nur langsam wenden.

<sup>2</sup> Vgl. Herminghaus, H. (2012).

<sup>3</sup> Vgl. Statista GmbH (2014).

und unterliegt teilweise massiven Schwankungen. Aus diesem Grund werden Speicher benötigt, die Energie zwischenlagern und bei Bedarf wieder zur Verfügung stellen können.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Speichertechnologie der Wasserstoffspeicherung mit anschließender Rückverstromung analysiert. Durch die Elektrolyse kann durch Strom Wasserstoff hergestellt werden, der in unterirdischen Kavernen gespeichert wird. Besteht ein Bedarf an Strom, wird dieser Wasserstoff aus der Kaverne entnommen und kann durch Anlagen in elektrische Energie umgewandelt werden. Für die Umwandlung existieren unterschiedliche Prozesse, die im Laufe der Arbeit näher erläutert werden. Ziel dieser Arbeit ist es, die Funktionsweise des gesamten Prozesses zu erläutern und sowohl technische als auch ökonomische Aspekte einzelner Prozessschritte zu identifizieren. Dabei sollen unterschiedliche Möglichkeiten für einzelne Komponenten beleuchtet und verglichen werden sowie die technische und ökonomisch sinnvollste Alternative gewählt werden.

Ein weiteres Ziel ist die Formulierung von Aussagen über die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffspeichern mit Rückverstromung, die sowohl über den aktuellen als auch zukünftigen Stand getroffen werden sollen. Anhand dieser Zielsetzungen lassen sich folgende Leitfragen ableiten:

- Wie funktionieren die einzelnen Komponenten einer Wasserstoffspeicheranlage mit Rückverstromung und welche Gestaltungsmöglichkeiten liegen vor?
- Wie schnell kann auf diese Energie zurückgegriffen werden und welche Menge steht dann zur Verfügung?
- Ist mit den aktuellen Voraussetzungen ein wirtschaftlicher Betrieb möglich?
- Welche Fortschritte werden für die Zukunft vorausgesetzt und wie hoch ist die technische und wirtschaftliche Verbesserung?
- Wie hoch müssen die Benutzungsstunden sein, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten?

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss des einleitenden Teils dieser Arbeit folgt in Kapitel 2 die Vermittlung der theoretischen Grundlagen und Begrifflichkeiten des deutschen Energiesystems. In Kapitel 3 wird zunächst entlang der Wertschöpfungskette die Funktionsweise einzelner Komponenten einer Wasserstoffspeicheranlage mit Rückverstromung erläutert und zusätzlich technische und finanzielle Aspekte identifiziert. Dabei wird auf unterschiedliche Möglichkeiten einzelner

Prozessschritte eingegangen und zwischen derzeitigen Voraussetzungen und zukünftigen Voraussetzungen im Jahr 2030 anhand von Prognosen unterschieden. Auf Basis dieser Informationen wird eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt und verschiedene Kombinationen der Möglichkeiten untersucht. Zu diesem Zweck werden sowohl Kostenfunktionen und Erlösfunktionen in einem iterativen Prozess anhand verschiedener Annahmen entwickelt, um schließlich eine Einschätzung über den jährlichen Gewinn geben zu können. Anschließend wird mit einer Break-Even-Analyse untersucht, wie hoch die Benutzungsstunden der Anlage sein müssen, damit sich die Investition rentiert. Am Ende des Kapitels wird noch eine Handlungsempfehlung ausgesprochen. Zum Schluss werden in Kapitel 4 die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und wesentliche Resultate diskutiert. Anschließend wird ein kurzer Ausblick über wichtige zukünftige Forschungsschwerpunkte gegeben.

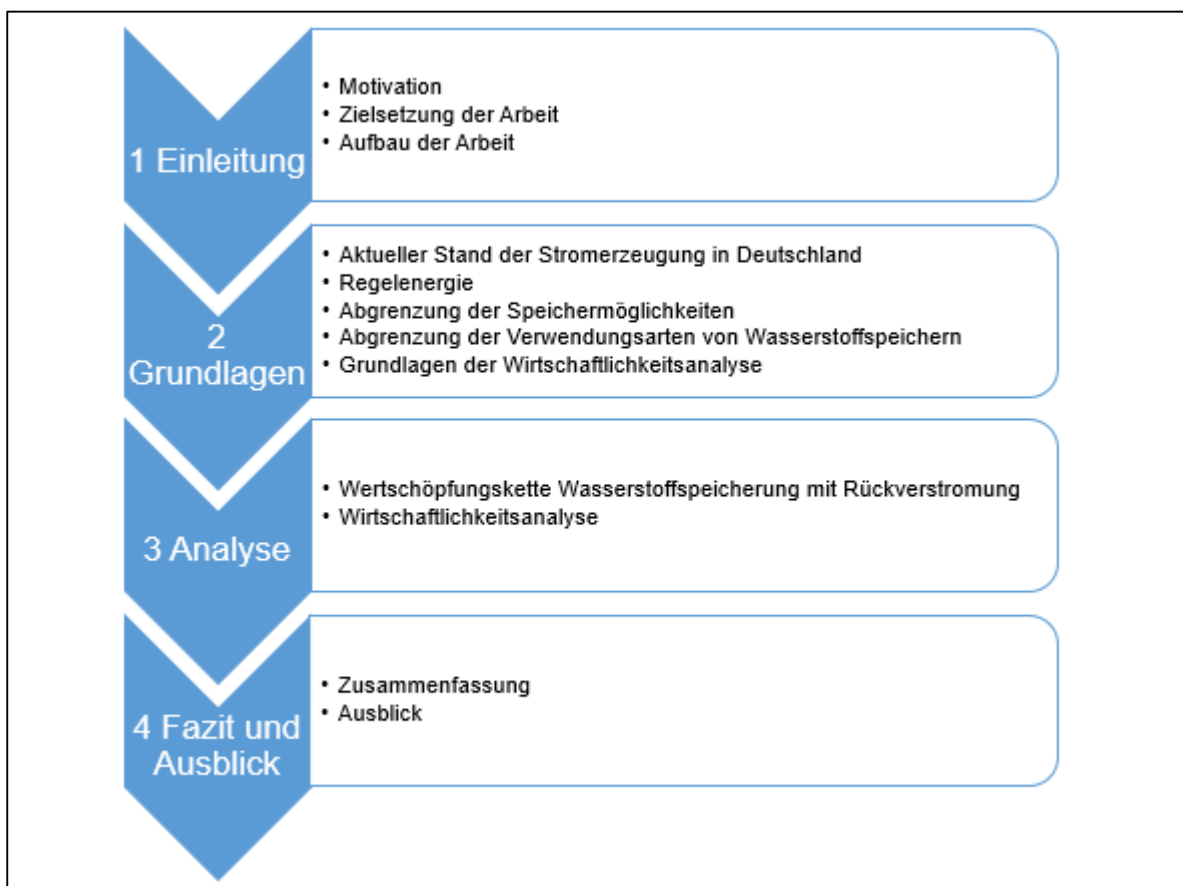


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit  
 Quelle: eigene Darstellung

stattdessen die Entwicklung bis 2030 zu verfolgen, um somit von möglicherweise besseren technischen und finanziellen Voraussetzungen zu profitieren.

## 4.2 Ausblick

Aufgrund der Notwendigkeit von Speichertechnologien hinsichtlich der Energiewende besteht durchaus der Bedarf, das Thema der Wasserstoffspeicherung mit Rückverstromung intensiver zu untersuchen. Dazu ist es erforderlich, technische und finanzielle Aspekte zu optimieren, um einen wirtschaftlichen Betrieb in der Zukunft zu ermöglichen. Besonderes Entwicklungspotenzial bieten die Verdichter zur Wasserstoffspeicherung sowie Brennstoffzellen. Bei den Verdichtern ist es wichtig, dass an der höheren Modulgröße geforscht wird, um die Anzahl der benötigten Verdichter zu verringern. Damit würden deutlich geringere Anschaffungskosten entstehen, was essentiell für einen wirtschaftlichen Betrieb ist. Bei der Rückverstromung sollte vor allem der Fokus auf die Optimierung der PEMFC gelegt werden, da diese aufgrund ihres nahezu emissionsfreien Betriebes besonders attraktiv hinsichtlich des Leitgedankens erscheint, der hinter der Energiewende steht. Um die Kosten der PEMFC verringern zu können, ist vor allem die Erhöhung der Leistung von Bedeutung. Insgesamt sollte in der Forschung das Ziel gesetzt werden, sowohl Anschaffungskosten als auch Betriebskosten zu reduzieren, um in absehbarer Zeit einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Denn nur wenn die Stromversorgung mittels erneuerbarer Energien rentabel ist, kann das Ziel, bis 2050 einen Anteil an erneuerbaren Energien an der Stromversorgung von 80% aufzuweisen, erreicht werden bzw. nur dann ist dieses Ziel auch wirtschaftlich. Falls dieses Ziel in Zukunft für Unternehmen nicht wirtschaftlich genug ist, werden die Endverbraucher die Kosten durch Umlagen und höhere Steuern tragen müssen. Eine derartige Situation könnte großen Unmut in der Bevölkerung verursachen, denn Menschen denken kurzfristig. Sie sehen lediglich die immer höher werdende Stromrechnung anstatt das zu sehen, was langfristig durch die Energiewende erreicht werden kann.